

Heikki Salmi

Värähtelyt, niiden toteaminen ja vaimentaminen sähkökäytöllä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

20.04.2017

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Heikki Salmi Värähtelyt, niiden toteaminen ja vaimentaminen sähkökäytöllä 36 sivua 20.04.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Eero Kupila Käyttöönottotiimin vetäjä Jouni Palojärvi
<p>Insinöörityössä tarkastellaan värähtelyjen ja erityisesti vääntövärähtelyn mittaamiseen, toteamiseen ja vaimentamiseen liittyviä tekijöitä. Tutkimuksen pohjalta luotiin vääntövärähtelynvaimennukseen soveltuva työohje, jonka tarkoituksena on ohjastaa oikeanlaiseen taajuusmuuttajan parametrintiin tilanteessa, jossa aktiivivaimennus on otettava käyttöön. Sähkömoottori ja siihen akselilla kytketty kuorma, muodostavat yhdessä järjestelmän jolla on tiettyjä resonanssitajuuksia. Järjestelmän ominaistaajuinen voimakas värähtely voi aiheuttaa merkittäviä mekaanisia ongelmia koneeseen ja ympäristöön.</p> <p>Opinnäytetyössä käsitellään vääntövärähtelyn vaimennukseen liittyvien parametrien toimintaa ja vaikutusta. ABB osakeyhtiö tarjosi paperikone-sovelluksia simuloivan testauslaitteiston, minkä avulla testaustuloksista saatiin mahdollisimman luotettavat. Toimeksiantajan tarpeet kohdistuivat lähinnä paperikone-sovelluksiin, jonka vuoksi työssä käsitellään myös niiden keskeisiä vaatimuksia ja ominaisuuksia.</p> <p>Vääntövärähtelyjä voidaan vaimentaa mekaanisesti kuin aktiivisesti sähköisesti taajuusmuuttajakäytöllä. Usein paras värähtelynvaimennus menetelmä on sähköinen vaimennus, jolloin koneen mekaanisia ominaisuuksia tarvitse muuttaa vaan korjaus voidaan toteuttaa taajuusmuuttajan oikealla parametroidinnalla. Aktiivivaimennuksen käyttö vääntövärähtelynkorjauksessa on erittäin toimiva menetelmä, mutta onnistunut parametointi edellyttää korkeaa ammattitaitoa ja tietämystä käytettävistä laitteista ja sovelluksesta.</p> <p>Työssä havaitaan selkeästi, että aktiivivaimennuksella voidaan vaikuttaa merkittävästi vääntövärähtelyyn ja oikealla parametroidinnalla on mahdollista vaimentaa vääntövärähtelyn amplitudia merkittävästi. Aktiivivaimennuksen onnistunut toteutus vaatii todennäköisesti useita säätö ja analysointi kertoja.</p>	
Avainsanat	Vääntövärähtelynvaimennus, Sähkökäyttö, Taajuusmuuttaja

Author Title Number of Pages Date	Heikki Salmi Detecting and Fixing Oscillations with Electrical Drive System 36 pages 20 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electrical power engineering
Instructors	Eero Kupila, Senior Lecturer Jouni Palojarvi, Commissioning Team Leader
<p>This study surveys vibrations and particularly the measuring, detecting and damping factors of torsional vibrations. Based on this research, instruction document for torsional vibration damping, purposed to guide for right kind of programming of frequency converter if active damping is required, was created. Electrical motor and load connected by axle, forms a system which has particular resonance frequencies. Heavy vibration of natural vibration frequency in a system may cause significant mechanical problems to the machine or environment.</p> <p>This thesis deals with functions and effects of parameters used in torsional vibration damping. ABB Ltd. offered facilities to simulate paper machine applications, which helped to get as reliable test results as possible. Thesis deals with paper machine drive requirements and properties, because needs of the client are mostly paper machine applications.</p> <p>Torsional vibrations can be damped with mechanical changes or by active damping of electrical drives. Electrical damping is usually the best choice in vibration damping, because then machines mechanical features need not to be changed, but can be fixed by correct programming. It's very effective method to use active damping in torsional vibration damping, but correct programming requires high level of proficiency and knowledge about used equipment and application.</p> <p>The results show that with active damping it is possible to make big difference to torsional vibration and with right kind of a programming, it is possible to make significant damping to the amplitude of torsional vibration. Successful active damping probably requires multiple adjustment and analyses.</p>	
Keywords	Torsional vibration damping, Drives, Frequency converter

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto	1
2 Paperikone	2
2.1 Paperikone yleisesti	2
2.2 Paperikone käytöt	3
2.2.1 ACS880 malliston ominaisuuksia	3
2.2.2 Linjakäytön periaate	4
2.3 Paperikoneen käytölle asettamat vaatimukset	6
2.3.1 PID-Säätö	6
2.3.2 Nopeuden ja kireydensäätö	7
2.3.3 Isäntä/orja-toiminto	8
3 Mekaaniset värähtelyt	10
3.1 Värähtelyn esiintyminen	10
3.2 Värähtelyn aiheuttamat haitat & vauriot	11
3.3 Värähtelyn toteaminen	12
3.4 Vääntövärähtelyn korjaaminen mekaanisesti	14
4 Värähtelyn sähköinen korjaaminen	15
4.1 Värähtelyn korjaus parametrit ACS 880	15
4.2 Sähköisen värähtelyn korjauksen edut	18
5 Mittaukset	19
5.1 Värähtelyn mittaaminen ja matemaattinen käsittely	19
5.2 Mittausjärjestelyt vääntövärähtely kokeessa	20
5.3 Vääntövärähtelyn toteaminen ja analysointi	22
6 Parametroinnin vaikutukset	24
6.1 Vaihesiirron vaikutus värähtelykorjauksessa	25
6.2 Vahvistuksen vaikutus värähtelykorjauksessa	26
6.3 PI-Säädön vaikutus värähtelykorjauksessa	27
6.4 Herätepulssien vaikutus kompensoituun mekaniikkaan	28
7 Yhteenveto	29
Lähteet	31

LYHENTEET

ABB	Asea Brown Boweri, yritys.
AC	Alternative Current, vaihtovirta.
DC	Direct Current, tasavirta.
DTC	Direct Torque Control, suora momenttiosaus.
FFT	Fast Fourier Transformation, laskenta algoritmi.
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, ohjattava puolijohde komponentti.
kW	kilowatti, tehon yksikkö.
PID	Propotional Integral Derivative, taajuusmuuttajan sisäinen nopeussäätäjä
RDC	Recommended Drive Capacity, kuorma, joka käytön on kestävä kiihdytyksessä ja jarrutuksessa.
SIL	Safety Integrity Level, turvallisuustaso, standardien SFS-IEC 61508 ja SFS-EN 62061 määrittelemä taso.
STO	Safe Torque Off, turvatoiminto, estää koneen odottamattoman tai vahingollisen käynnistymisen.
%s	Prosenttisekunti, dynaamisen nopeustarkkuuden yksikkö, kuorman muutoksen aiheuttama poikkeama-alue, saadaan kertomalla maksimipoikkeaman arvo (%) sekä vasteajan arvo (s) keskenään ja jakamalla tulos kahdella.

1 Johdanto

Opinnäytetyö tehdään ABB-osakeyhtiön Process Industries-divisioonalle. Työssä tutkitaan ACS880 taajuusmuuttaja malliston ominaisuuksia, vääntövärähtelyjen vaimentamisessa. Työssä esitetään eri parametrien ominaisuuksia vääntövärähtelyjen vaimennuksessa sekä säädön toimivuutta tilanteessa, jossa järjestelmään kohdistuu herätepulsseja. Toimeksiantajan sovellustarpeista johtuen, työssä käsitellään myös paperikoneiden vaatimuksia ja yleisimpiä ominaisuuksia. Laadun ja koneiden eliniän kannalta, värähtelynkorjaus on paperikoneissa ensisijaisen tärkeää.

Värähtelyllä on lukuisia negatiivisia vaikutuksia koneisiin ja ympäristöön, kuten koneen osien ja rakenteiden väsymistä, liitosten löystymistä ja ergonomisia haittoja. Tämän vuoksi niiden mittaukseen ja vaimennukseen tutkitaan jatkuvasti uusia, entistä tarkempia ja tehokkaampia menetelmiä. Koneiden ja laakerien valmistajat mittaavat usein käytön aikaisia värähtelyjä omista tuotteistaan, mutta akselin vääntövärähtelyjen mittaaminen on usein hankalaa ja jää tekemättä. Tämän vuoksi taajuusmuuttajalta saatavista mittaustuloksista tehtävä vääntövärähtelyanalyysi, ja analyysin pohjalta tehtävä värähtelynkorjaus on merkittävä laatua nostava tekijä käyttöönotossa.

Värähtelynvaimennukseen on olemassa myös mekaanisia korjausmenetelmiä, joita käsitellään tarkemmin luvussa kolme. Usein mekaanisiin muutostöihin ei kuitenkaan tarvitse ryhtyä, mikäli moottoria ohjataan taajuusmuuttajakäytöllä, koska taajuusmuuttajakäytön oikeanlaisella parametroinnilla voidaan vaimentaa vääntövärähtelyjä tehokkaasti.

ABB esitteli linjakäyttöjen värähtelynvaimennusominaisuuden ACS880-mallistoa jo kauan sitten edeltäneessä ACS600-mallistossaan. Mutta vasta ACS800-mallista lähtien on oscillation damping ollut osa käyttöönottoa. Käyttöönotossa ilmenneiden ongelmien vuoksi Application and Field Services-yksikkö teetti tämän tutkimuksen värähtelynvaimennuksesta ACS880-taajuusmuuttajan avulla.

2.2 Paperikonekäytöt

Aiemmin paperikoneet rakennettiin siten, että teloja pyöritettiin yhtäaikaaisesti, suuren valta-akselin ja useiden vaihdelaatikkojen avulla. Taajuusmuuttajien kehittymisen myötä, valta-akseleista ja DC-käytöistä ollaan luopumassa, sitä mukaan kuin paperikoneita modernisoidaan. Nyky mallilla jokaista telaa pyörittää yksi tai useampi moottori, joita ohjataan taajuusmuuttajilla.

Lukuisten rullainkäyttöjen lisäksi, paperikoneissa on valtavat määrät erilaisia pumppuja, puhaltimia, sekoittimia, nostimia yms, minkä pyörittämiseen tarvitaan usein taajuusmuuttajakäyttö. Yksinkertaisissa sovelluksissa, missä moottorin halutaan pyörivän vain yhtä haluttua nopeutta, voidaan käyttö toteuttaa myös suoraikäyttönä.

2.2.1 ACS880-malliston ominaisuuksia

ACS880 on ABB:n tuoteperheen vuonna 2012 ilmestynyt jäsen. Jokainen ACS880-taajuusmuuttaja sisältää mahdollisuuden DTC-ohjaukseen, joka mahdollistaa suuren tarkkuuden moottoriohjauksessa, ilman minkäänlaista takaisinkytkentää. Lisäksi tuoteperheellä pystytään ohjaamaan lähes jokaista moottorityyppiä. STO-toiminto on integroitu jokaiseen ACS880-taajuusmuuttajaan, jonka ansiosta kahdennetulla johdotuksella ne täyttävät SIL 3-luokan asettamat vaatimukset. (7,9.)

Edeltäjänsä verrattuna ACS880 tarjoaa huomattavasti nopeammat prosessorit, sekä laitteiden kotelointikokoa on pienennetty suhteessa teholuokkaan. ACS880:stä on saatavana lukuisia eri malleja, riippuen käyttötarkoituksesta. Seuraavassa kerrotaan eri yksittäiskäyttöjen ominaisuuksia, jotka löytyvät myös monimoottorikäytöistä.

ACS880-01 on 5,5–250 kW:n tehoalueelle suunniteltu, seinään asennettava taajuusmuuttaja, joka on soveltuva laitteiden, kuten nostureiden, vinssien, puolauskoneiden, kuljettimien, sekoittimien, kompressorien, pumppujen sekä puhaltimien ohjaukseen. (7.)

ACS880-07 on 45–2800 kW:n teholuokalle, kaappiin asennettava, täysin käyttö-tarkoitukseen räätälöitävä taajuusmuuttajamallisto, joka on suunniteltu vastaamaan energia-, kaivos-, kemian- ja prosessiteollisuuden tarpeita. Kaappeihin asennetaan omat sulakkeet sekä pääkytkin. (7.)

ACS880-17 on 160–3000 kW:n tehoalueelle suunniteltu kaappiin asennettava, verkkoon jarruttava taajuusmuuttaja-mallisto. Verkkoonjarrutuksella saadaan aikaan tuntuvat energiansäästöt, koska moottorien jarrutuksessa tuottamaa energiaa ei turhaan muuteta lämmöksi, vaan se saadaan ohjattua suoraan sähköverkkoon. Tosin syöttöyksiköstä tulee hieman monimutkaisempi ja kalliimpi vaihtoehto, kun syöttö toteutetaan IGBT-syötöllä, diodejen sijaan. (7.)

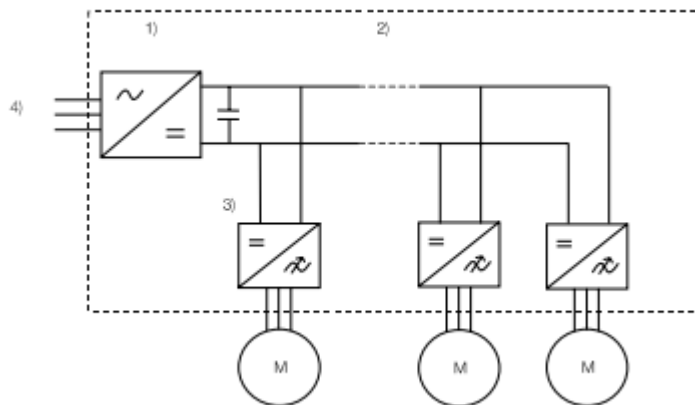
ACS880-37 on myös 160–3000 kW:n tehoalueelle suunniteltu, kaappiin asennettava matalaharmoninen taajuusmuuttaja. Tämä mallisto on suosittu sovelluksissa, joissa on ongelmia sähköverkon harmonisten virtayliaaltojen kanssa. Mallisto perustuu 12-pulssisiin ja 18-pulssisiin tasasuuntaajiin jotka tuottavat huomattavasti vähemmän harmonisia aaltoja kuin 6-pulssiset tasasuuntaajat. (7.)

2.2.2 Linjakäytön periaate

Tyypillisesti nykyaikaista paperikonetta ohjataan linjakäytöllä, jossa moottoreita syöttävillä vaihtosuuntaajilla eli inverttereillä on yhteinen tasajännitevälipiiri, johon syötetään tehoa tasasuuntaajilla. Kuvassa 2 näkyy linjakäytön periaatekuva. Yhteisen välipiirin suurin etu on siinä, että kun yksi moottori joutuu syystä tai toisesta jarruttamaan, se syöttää tehoa välipiiriin, joka voidaan käyttää toisen moottorin tehonsyöttöön. Näin säästetään suuria määriä energiaa.

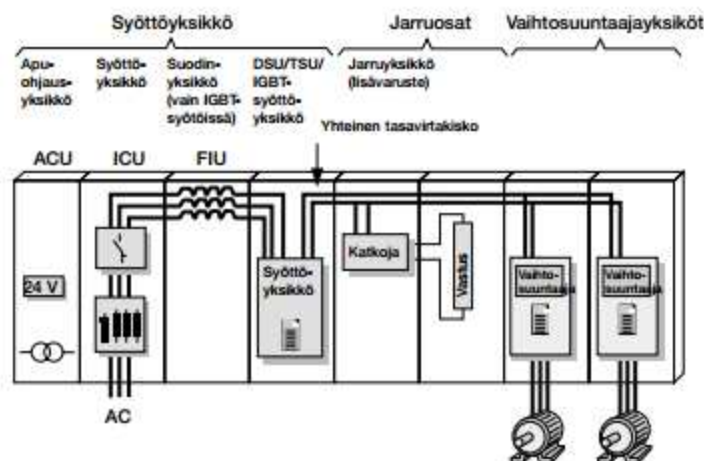
Yhteisellä välipiirillä saavutetaan merkittäviä säästöjä kaapelointikustannuksissa. Erillisillä taajuusmuuttajilla toteutettuun käyttöön tarvitaan moninkertainen määrä syöttökaapelia, koska jokaiselle taajuusmuuttajalle on tuotava oma AC-syöttö keskukselta yhden suuren syötön sijasta. Paperitehtaassa on tuhansia taajuusmuuttajaohjattuja moottoreita, ja esimerkiksi Stora Enson Kaukopään tehdasintegraattia pyörittää yli kymmenentuhatta sähkömoottoria, jolloin linjakäytöistä saatavat syöttökaapelikustannus säästöt nousevat investointikustannuksissa merkittävään rooliin.

Integraattiajattelulla tarkoitetaan sitä, että samalla tehdas alueella tai välittömässä läheisyydessä sijaitsee omistajakonsernien muuta teollisuutta jakamassa kustannuksia.



Kuva 2. Sähkökäyttö, jossa on 1) Erillinen syöttöyksikkö, 2) Yhteinen välijännitepiiri, 3) Vaihtosuuntaaja yksiköt, 4) Ulkoinen sähkönsyöttö (3.)

Samaan välipiiriin voi kytkeä useita vaihtosuuntaajia. Lukumäärää rajoittava tekijä on käytännössä vain tehon syöttö ja välipiirin virrankestoisuus. Välipiiriin syötetään tehoa tasasuuntaajilla, jotka ovat usein toteutettu 6-pulssisella diodisillalla, mikäli olosuhteet eivät vaadi 12- tai 18-pulssista suuntausta tai IGBT-siltausta. Jännitteen tasasuuntauksen jälkeen teho syötetään välipiiriin, johon invertterit ovat kytkettyinä.



Kuva 3. Yhteisen tasavirtakiskon perusrakenne. (4.)

IGBT-sillalla toteutetulla syötöllä voidaan jarrutusenergia syöttää takaisin verkkoon. Jarrutusenergia voidaan vaihtoehtoisesti ohjata erillisen IGBT katkojan avulla jarruvastuksiin, joissa sähköinen energia muuttuu lämmöksi (4.)

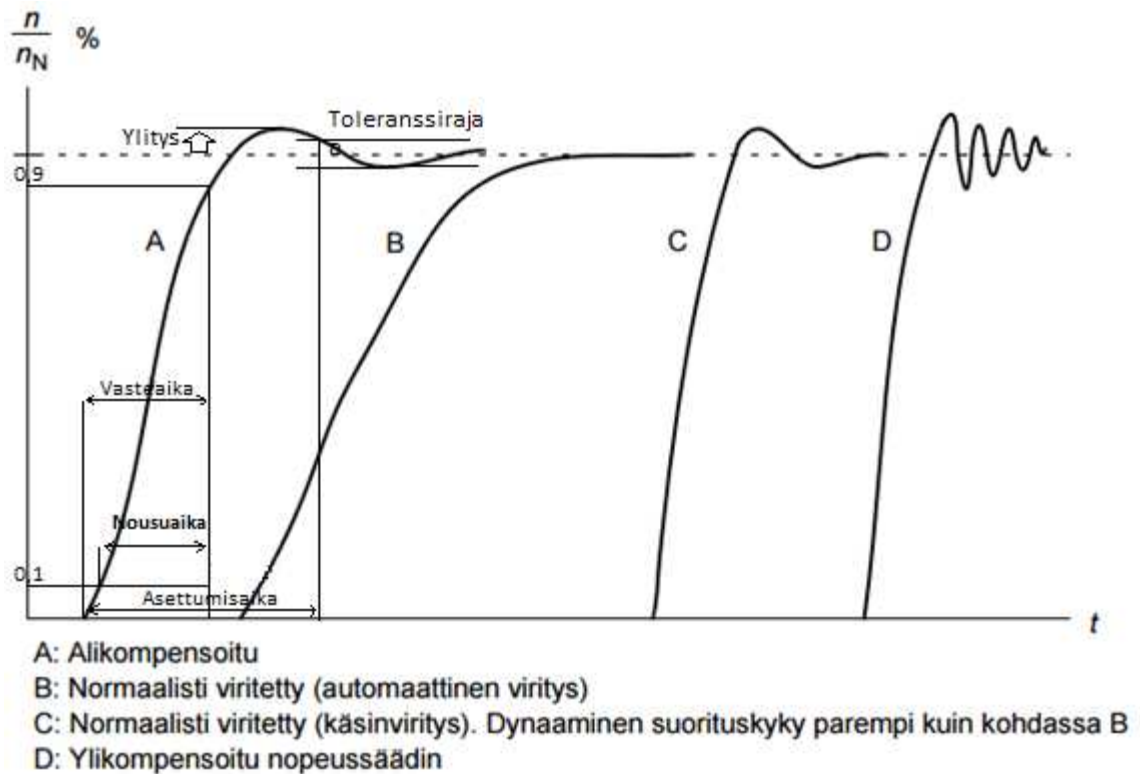
2.3 Paperikoneen käytölle asettamat vaatimukset

Paperikoneet vaativat käytöiltä aina paljon verrattuna moniin muihin koneisiin. Käyttöjen tulee olla todella tarkkoja säädöiltään, ja niiden tulee reagoida häiriöihin nopeasti ja tarkasti jotta vältetään laatupoikkeamilta.

2.3.1 PID-säätö

PID-säätäjällä pyritään terävöittämään käytön reagointia äkillisesti muuttuvaan momenttitarpeeseen. Kuvassa 4 on esiteltynä PID-säätäjän vaikutus nopeuden muutokseen. Käytännön vitystilanteessa ei paperikoneiden osalta käytetä automaattista vitystä, vaan vitytys suoritetaan kokeellisesti askelvastemenetelmällä. Säätimelle asetetut vaatimukset (stabiilius, nopeus ja tarkkuus) ovat osittain ristiriidassa keskenään, koska nopeuden lisääminen huonontaa järjestelmän stabiiliutta (aiheuttaa esimerkiksi vääntöväärhtelyä, katso kohta 6.3). Vityksessä on pyrittävä tekemään mahdollisimman toimiva kompromissi säätö-parametrien välillä. (11.)

Vasteaika on aika, joka kuluu muutoksen antamisesta hetkeen, jolloin lähtö on saavuttanut tietyn arvon. Nousuaika lasketaan siitä hetkestä, kun prosessi on saavuttanut kymmenen prosenttia jatkuvan tilan arvostaan siihen hetkeen, kun prosessi saavuttaa yhdeksänkymmentä prosenttia jatkuvan tilan arvosta. Kuvassa 4 on esiteltynä myös askelvasteen tunnusarvoja, jotka on määritetty vasteen ja ohjauksen keskinäisestä käyttäytymisestä. (11.)



Kuva 4. PID-säätimen vaikutus pyörimisnopeuteen (5.)

Vaikka viritys tehdään aina sovellus kohtaisesti on paperikoneissa PI-säätäjän perinteinen viritystapa usein kuvan 4 C mukainen. PI-säätäjässä on siis käytössä kaksi tekijää: vahvistus ja integrointi-aika. Vahvistuksella määritellään säätäjän ulostulo-signaalin vahvistuksen suuruus eroarvoon nähden. Tämän ominaisuuden avulla saadaan aikaan voimakkaammin nopeuden muutokseen reagoiva käyttö. Integrointi-aika määrittää, kuinka nopeasti säädin reagoi eroarvon ollessa vakio. Mitä lyhyempi on integrointi-aika, sitä nopeammin käyttö saavuttaa toleranssirajan. Yksinkertaistettuna, vahvistuksella voidaan lyhentää nopeuden vaste-aikaa ja integroinnilla asettumisaikaa. (5.)

2.3.2 Nopeus ja kireyys

Staattisen nopeuden tarkkuus kuvaa nopeusohjeen resoluutiota, nopeuden toistettavuutta ja nopeusmittauksen vakautta. Normaalitapauksessa staattisen säädön toleranssina pidetään 0,01 % maksiminopeudesta. Staattinen tarkkuus on eroarvo taajuusnäytteiden keskiarvon ja nopeusohjeesta lasketun pulssitaajuuden (1.1.) välillä.

$$\text{Pulssitaajuus} = \frac{\text{Pulssia per kierros} \times \text{Pyörimisnopeus (Rpm)}}{60} \quad (1.1)$$

Nopeuden dynaaminen tarkkuus kuvaa nopeuden vakautta, prosessin tai sähköverkon aiheuttamissa häiriöissä. Dynaamisen säätötarkkuuden tulee täyttää tarkkuuden 0,1 %:n toleranssi myös häiriötilanteissa. Rajat, joiden puitteissa käytön säätötarkkuus pysyy riittävän tarkkana, ovat seuraavat: Syötöverkon taajuuden vaihtelu ± 3 prosenttia, AC-syöttöjännitteen vaihtelu nimellijännitteestä ± 10 prosenttia, kuorman vaihtelu käytön määritellystä RDC-kuormasta ± 10 prosenttia. Dynaaminen tarkkuus on nopeuden oloarvojen poikkeama staattisen tarkkuuden (0,01 %) toleranssista. Tarkkuus määritellään nopeuden suodatetusta oloarvo käyrästä.

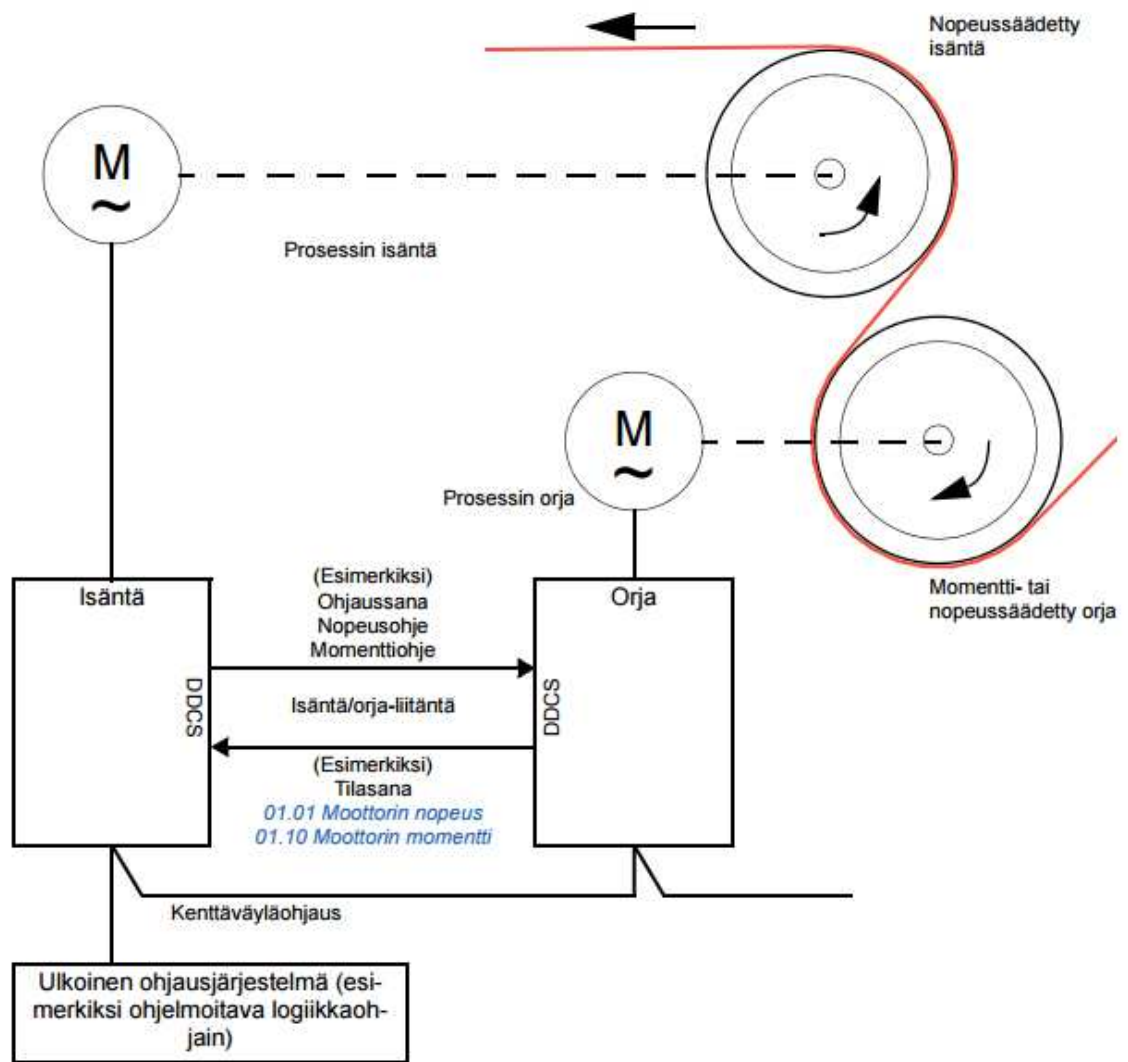
Nopeussäädön vaatimuksissa on eriteltynä staattinen ja dynaaminen tarkkuus. ABB lupaa DTC-ohjatun käytön yltävän staattiselta nopeustarkkuudeltaan kymmeneen prosenttiin moottorin jättämästä, joka tarkoittaa 11 kW:n koneessa 0,3 % ja 110 kW:n koneessa 0,1 %. Dynaamisen tarkkuuden osalta nopeustarkkuus on 0,3–0,4 %s, säätimen vahvistuksesta riippuen. Käytettäessä pyörimisnopeutta mittaavaa pulssi-anturia takaisinkytkennässä, ylletään staattisessa tarkkuudessa 0,01 %:iin ja dynaamisessa nopeustarkkuudessa 0,1 %:iin (1.)

Kireyssäädölle annetut toleranssiarvot ovat huomattaasti suurempia kuin nopeuden toleranssit. Normaali-tilanteessa kireyssäädön staattisen tarkkuuden toleranssina pidetään yhden prosentin tarkkuutta tasaisen ajonopeuden rata- ja akselivakauden maksimista. Staattinen kireyden tarkkuus kuvaa kireyssäätäjälle tulevan analogiasignaalin pitkän aikajakson vakautta. Kireyspoikkeama määritellään mitatusta kireyden oloarvosta.

Kireyssäädön dynaamista tarkkuutta ei ole paperikonesovelluksille määritelty. Normaali toleranssina kiihdytys- ja hidastustilanteissa kuitenkin pidetään kahta prosenttia maksimi kireydestä. Vakionopeudella ajettaessa toleranssi on neljä prosenttia. (6,15.)

2.3.3 Isäntä-orjatoiminto

Mikäli moottorikäyttö on kytketty yhteen hihnalla, vaihteistolla, ketjuilla tai muilla vastaavilla ratkaisuilla tai halutaan kuorman jakaantuvan tasaisesti taajuusmuuttajien välillä, on isäntä-orjatoiminto paras mahdollinen ratkaisu. Toiminto toteutetaan yleensä siten, että ulkoinen ohjaussignaali tuodaan ainoastaan yhteen taajuusmuuttajaan, joka toimii isäntänä. Yhdellä isännällä voi olla samanaikaisesti jopa 58 orjaa. Kuvassa 5 on esitettyä esimerkki isäntä-orjatoiminnon käyttömahdollisuuksista. (5.)



Kuva 5. Isäntä-orjatoiminto. (5.)

Isäntäyksikön ohjaustavan toteutus riippuu yleensä kytkentätavasta, jolla mekaniikat ovat kytkettynä toisiinsa. Tavanomaisesti käytetään momenttiohjausta, kun kytkentätapana on käytetty jäykkää liitosta, kuten vaihdetta tai ketjua. Nopeusohjausta käytettäessä mekaniikan kytkentä on yleensä joustava, esimerkiksi hihna.

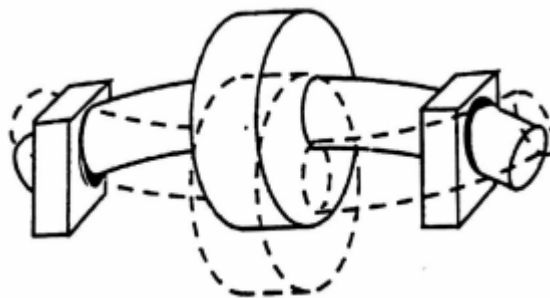
Orjana toimivien taajuusmuuttajien ohjaustapa on myös riippuvainen käyttö sovelluksesta. Joissain tapauksissa orjayksikön tulee olla sekä nopeus- että momenttiohjattu. Tilanteessa, jossa halutaan jakaa kuorma yhden tai useamman taajuusmuuttajan välillä on orjien ohjauksessa käytettävä momenttiohjausta. (5.)

3 Mekaaniset värähtelyt

3.1 Värähtelyjen esiintyminen

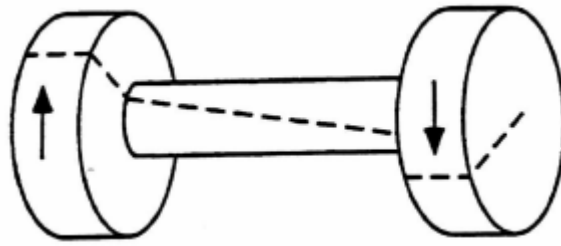
Mekaaninen värähtely on rakenteen, koneen tai koneen liikettä tasapainoasemansa ympärillä. Värähtely tarvitsee jatkuakseen voiman, jonka suunta tai suuruus on muuttuva. Tämänkaltaista värähtelyä kutsutaan pakotetuksi värähtelyksi. Vapaaksi värähtelyksi kutsutaan värähtelyä, johon ei vaikuta lainkaan ulkoisia voimia, joten ajan kuluessa se vaimenee ja katoaa kokonaan pois (Nohynek & Lumme 2004). Pyörivien koneiden mekaniikassa esiintyvät värähtelyt voidaan jakaa kolmeen ryhmään: kieppumiseen (lateral vibration), vääntövärähtelyyn (torsional vibration) ja perustuksen värähtelyyn. (13.)

Kuvan 6 mukaista kieppumisvärähtelyä esiintyy usein laakerien väliin asenneteuissa pitkissä, nopeasti pyörivissä pyörivissä akseleissa, kuten turbiineissa ja suurnopeusmoottoreissa. Kieppumisvärähtelyä voisi verrata hyppynarun pyörimiseen. Kieppumisvärähtely johtuu akselin epäonnistuneesta tasapainottamisesta, jolloin akselin massakeskipiste siirtyy pois akselin keskiöstä. Havaittaessa kieppumisvärähtelyä pyritään kiihdytettäessä ohittamaan mahdollisimman nopeasti kriittiset nopeuden, joilla kieppumisvärähtelyä esiintyy. Pahimmassa tapauksessa värähtely voi nousta niin suureksi, että roottori osuu staattoriin rikkoen koneen.



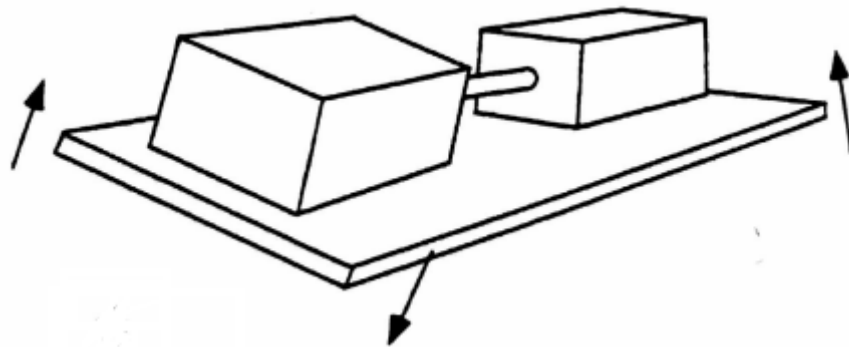
Kuva 6. Kieppumisvärähtelyn malli. (13.)

Kuvan 7 mukaista vääntövärähtelyä syntyy akseliin vaikuttavista herätteistä, jotka usein johtuvat kuorman hitausmomentin jaksollisesta tai pulssimaisesta muutoksesta. Vääntövärähtelyssä akselin osat kiertyvät suhteessa toisiinsa, koska akselin vääntöjousivakio ei kykene pitämään akselia riittävän jäykkänä. Vääntövärähtelyt ovat sähkökäyttöjen kannalta ehdottomasti yleisin värähtelytyyppi.



Kuva 7. Vääntövärähtelyn malli. (13.)

Kuvan 8 mukaista perustuksen värähtelyä ilmenee, kun sähkökäytön on ovat koottu sitä tukevalle alustalle, joka ei kuitenkaan ole äärettömän jäykkä. Vääntömomentin aiheuttamat voimat sekä ympäristön värähtelyt vaikuttavat perustusten värähtelyn voimakkuuteen.



Kuva 8. Perustuksen värähtely malli. (13.)

Tässä työssä on keskitytty järjestelmässä ilmenevän vääntövärähtelyn ja ominaisvärähtelyn vaimentamiseen. Värähtelyjen tyypit ja niiden matemaattinen mallinnus on selitetty tarkemmin Niirasen (13.) julkaisemassa kirjassa.

3.2 Värähtelyn aiheuttamat haitat ja vauriot

Värähtely aiheuttaa mekaanisiin järjestelmiin rasituksia, joiden suuruus riippuu esiintyvän värähtelyn amplitudista. Suuret värähtelystä johtuvat rasitukset voivat joskus johtaa materiaalien väsymiseen ja koneen rikkoutumiseen.

Väriöiden haitallisuus ilmenee myös lisääntyneinä jännityksinä, liitosten löystymisenä, käynnin epävarmuutena, energiahäviöinä, meluna tai muuna ergonomisena häirtana. Värähtelyn vaikutus yltää usein myös muihin ympärillä sijaitseviin koneisiin ja laitteisiin,

mikä puolestaan lisää koko järjestelmän ongelmia. Liiallinen väähtely vaikuttaa myös lopputuotteen laatuun heikentävästi sekä alentaa koneen käyttöikää, minkä vuoksi huollon tarve värähtelevissä koneissa lisääntyy.

Akseleissa tapahtuva vääntövärähtely on usein hankala havaita. Värähtelyn olemassaolo havaitaan usein kytkimen hajoamisena tai akselin katkeamisena. Kokemus on osoittanut, että: akselin katketessa 45 asteen kulmassa pyörimisakseliin nähden, löytyy syy usein voimakkaasta vääntövärähtelystä. Akselin jousivakion ja systeemin hitausmomentin aiheuttama ominaisvärähtely ei itsessään usein riitä vääntövärähtelyn syntymiseen, vaan syynä on systeemiin kohdistuva jaksollinen tai impulssi-mainen heräte.

3.3 Värähtelyn mittausmenetelmät

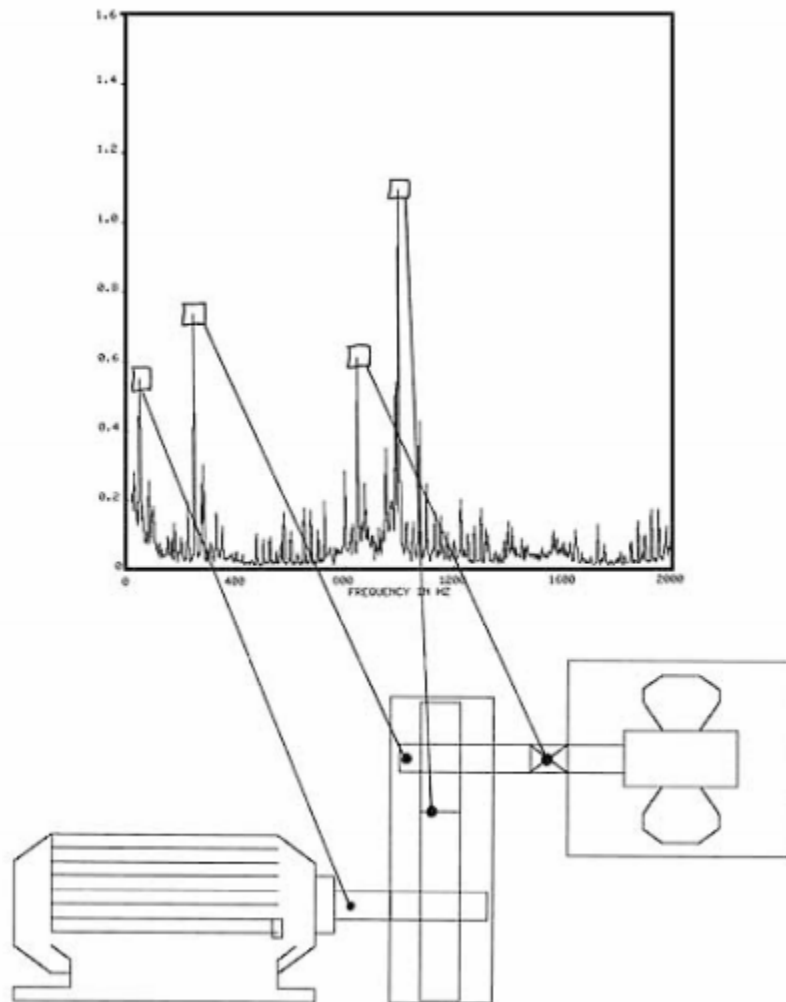
Värähtelyn mittaamiseen on kehitetty lukuisia erilaisia laitteita, joiden avulla voidaan todeta kunkin mekaniikanosan värähtelyt. Nohynek & Lumme (14.) esittelevät teok-sessaan lukuisia mittausjärjestelmiä sekä analysointimenetelmiä, joiden avulla voidaan havaita kieppumis- ja perustuksen värähtelyt, sekä laakereissa tapahtuvat vikaantu-minen.

Värähtelymittausmenetelmät voidaan karkeasti jakaa kahteen luokkaan: yksinkertaisiin ja monimutkaisempiin menetelmiin, jotka käytännössä erottaa toisistaan antureiden määrä, taajuusalue sekä analysointitapa.

Yksinkertaiset menetelmät koneiden yleistärinän valvontaan ja vierintälaakereiden kunnonvalvontaan. Sisältää tyypillisesti kaksi, selvästi toisistaan eroavaa mittaus-suuretta, millä selvitetään akselin pyörimiseen, sekä vierintälaakereihin liittyviä vikoja. Akselin pyörimiseen liittyvissä vioissa ilmenee 10–1000 Hz taajuisia värähtelyamplitudi-piikkejä, jotka yleensä johtuvat epätasapainosta, linjausvirheestä tai liitosten löysyy-destä. Vierintälaakereiden kunnonvalvonnassa käytetään korkea-taajuisen värähtelyn mittausta, tyypillisesti yli 2000 Hz. Korkeataajuisen värähtelyn on havaittu kasvavan selvästi, laakerivian tapahtuessa tai voitelukalvon kadotessa laakereista.

Esimerkiksi kuvan 9 mukainen monimutkaisempaa menetelmää käytetään koneiden tärinän yksityiskohtaiseen valvontaan ja laakereiden kunnonvalvontaan. Mekaniikan sisältäessä erinopeuksisia akseleita ja voimansiirtolaitteita, kuten hihnakäyttöjä tai

hammasvaihhteita, ei ensimmäisen luokan mittausmenetelmä tuo riittävää tarkkuutta. Toisen luokan mittausmenetelmällä havaitaan esimerkiksi epätasapainot toisella akselilla, mikä puolestaan voi johtua linjausvirheestä, laakeriviasta, rakenteen resonanssista, huonosta kiinnityksestä tai pumpun kavitaatiosta. Toisen luokan mittalaitteet ovat usein yksi tai moni kanavaisia spektrianalysaattoreita.



Kuva 9. Esimerkki luokan 2, monimutkaisesta värinämittausmenetelmästä (14.)

Vääntöväärhtelyt ovat hankalia mitattavia, eikä niitä välttämättä huomata ennen kuin jokin koneen osa antaa periksi, kuten kohdassa 3.2 todettiin. Sähkökäytöissä vääntöväärhteyt voidaan todeta, analysoimalla momentin ja pyörimisnopeuden muutoksia FFT-menetelmällä (kohta 5.1).

3.4 Vääntöväärähtelyn vaimentaminen mekaanisesti

Väärähtelyä saadaan vaimennettua myös systeemin mekaanisia ominaisuuksia muuttamalla. Kuorman hitausmomenttiin ei voida puuttua, joten yhtälöstä 1.2 havaitsee, että ainoa keino nostaa värähtelytaajuutta on muuttaa akselin vääntöjousivakiota. Yhtälöä 1.3 tarkastellessa on helppo havaita, akselin halkaisijan vaikuttavan neljännessä potenssissa vääntöjousivakion suuruuteen, joten akselin halkaisijan kasvattaminen on tehokkain mahdollinen keino, nostaa värähtelytaajuutta mekaanisilla muutoksilla.

Mekaanisilla muutoksilla, kuten akselin halkaisijan kasvattamisella, voidaan nostaa systeemin ominaistajuutta. Ominaistajuuden nostamisella on suuria etuja värähtelyn vaimentamisessa, koska systeemin vääntövaimennus tehostuu korkeammilla resonanssitaajuuksilla sekä värähtelyn amplitudi pienenee taajuuden kasvaessa.

Resonanssiin vaimentumaton resonanssitaajuus, eli ominaistajuus voidaan laskea yhtälöllä 1. Akselin vääntövaimennus (c) on useinmiten niin pieni, ettei lopputuloksen tarkkuus juurikaan kärsi vaikka se jätetään pois yhtälöstä.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K(J_m + J_l)}{J_m J_l} - \left(\frac{c(J_m + J_l)}{2J_m J_l}\right)^2}$$

$$\rightarrow \rightarrow \rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K(J_m + J_l)}{J_m J_l}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K \left(\frac{1}{J_m} + \frac{1}{J_l}\right)} \quad (1.2)$$

f_r on ominaistajuus

K on akselin vääntöjousivakio

J_m on roottorin hitausmomentti

J_l on kuorman hitausmomentti

Akselin vääntöjousivakio voidaan laskea yhtälöllä

$$K = \frac{G\pi}{32} \frac{d^4}{l} \quad (1.3)$$

G on akselissa käytettävän materiaalin liukukerroin

d on akselin halkaisija

l on akselin pituus

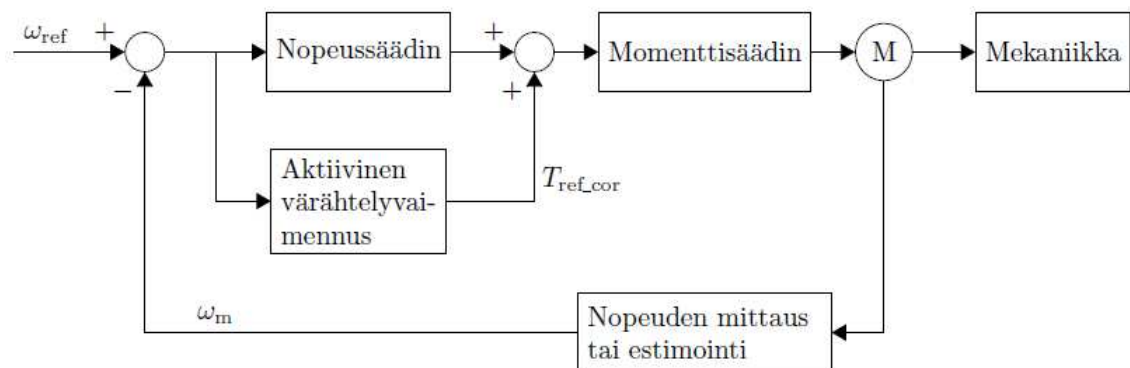
Koneenrakennuksessa käytettävälle teräkselle $\frac{G\pi}{32} \approx 7850 \text{ MN/m}^2$

4 Sähköinen värähtelykorjaus

Taajuusmuuttajien kehittymisen myötä niiden avulla pystytään myös vaimentamaan akselien vääntövärähtelyä. Tämän ominaisuuden avulla voidaan ehkäistä konerikkoja sekä käyttöönoton yhteydessä suorittaa ennakoivaa värähtelyjen analysointia.

4.1 Värähtelykorjausparametrit

ACS880 tarjoaa ratkaisun sähköiseen värähtelykorjaukseen. Oskillaation vaimennus ominaisuudella voidaan vaimentaa yhden taajuuden vääntövärähtelyt lähes kokonaan. Kuvassa 11 näkyvät oskillaation vaimennuksen säätöön tarvittavat parametrit sekä kuvassa 10 värähtelyvaimennuksen liittyminen momenttisäätöketjuun.



Kuva 10. Aktiivinen värähtelynvaimennus osana nopeussäädettyä käyttöä. (10.)

Värähtelynvaimennusmetodi on aina olosuhteista riippuvainen. Kompensointitapa valitaan värähtelyamplitudin ja dynamiikan vaatimusten perusteella. Joissakin tapauksissa värähtely voi olla niin voimakasta ja monimuotoista, että on välttämätöntä käyttää kaikkia värähtelykorjaukseen tarvittavia parametreja, jolloin kompensoinnin suorittaminen vaatii kompromisseja värähtelynvoimakkuuden ja dynamiikan välillä. Kompensoinnin pääparametrit ACS880-taajuusmuuttajassa ovat seuraavat:

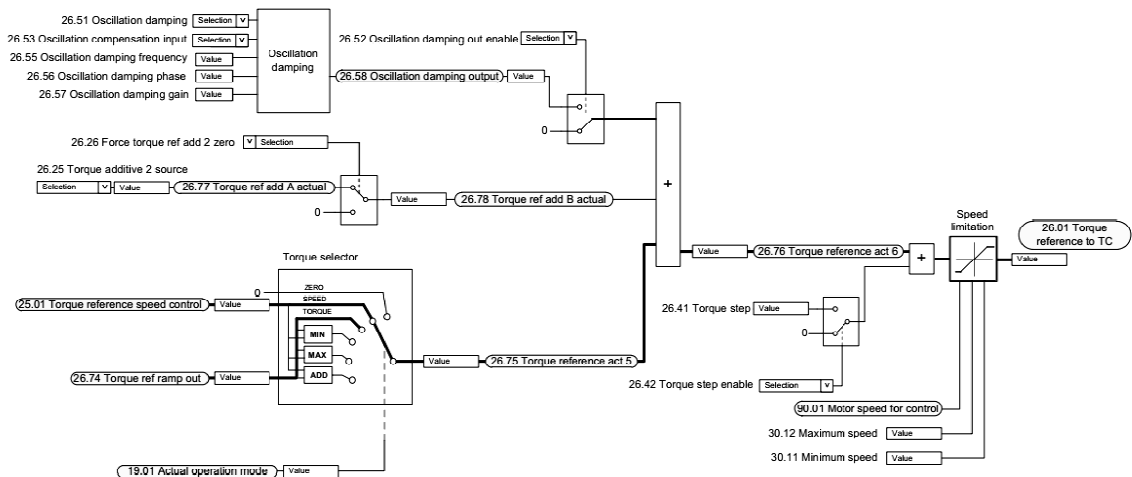
- Oskillaation vaimennuksen taajuus
- Oskillaation vaimennus, vaihe
- Oskillaation vaimennus, vahvistus
- Kriittinen nopeus minimi

- Kriittinen nopeus maksimi
- Nopeuseron suodatusaika
- Nopeuden suhteellinen vahvistus

Parametrilla oskillaation vaimennustaajuus määritetään vaimennettavan värähtelyn taajuus. Taajuus tulee määritellä oikein, jottei väärä säätö aiheuta ylimääräistä värähtelyä muille taajuuksille, vaan vaikuttaa nimenomaisesti vääntövärähtelyn ominaistaajuuteen. Värähtelytaajuuden selvittämistä on käsitelty tarkemmin luvussa 5.2.

Parametrilla oskillaation vaimennusvaihe asetetaan vaihesiirto värähtelynvaimennuksen ulostuloon. Oikeaan vaiheeseen osuva vastamomentti vaimentaa värähtelyä ja voi jopa poistaa sen kokonaan, mutta väärin säädetyn vaihesiirron on myös mahdollista voimistaa värähtelyä.

Oskillaation vaimennusvahvistus on parametri, jonka avulla lisätään suotimen lähtöarvoa, ennen kuin se lisätään momenttiohjeeseen. Tämä on siis parametri, joka on syytä säätää viimeisenä ja se toimii värähtelynvaimennuksen hienosäätönä. Vahvistusta on syytä säätää pienin askelin, jotta vältetään liialliselta vahvistukselta.



Kuva 11. Lohkokaavio momenttisäätimen ohjeen valinnasta (5.)

Lohkokaavion perusteella oskillaation vaimennussuodin summaa ulostuloohjeensa momenttiohjeen kanssa. Näiden ohjeiden summana saadaan lopullinen momenttiohje, joka viedään momenttisäättäjälle.

Kaikkia värähtelypiikkejä ei oskillaation vaimennuksella pystytä kuitenkaan eliminoidaan. Nopeusalue, jolla värähtelyä ilmenee vielä oskillaation vaimennuksen jälkeen (katso kuva 20 sivulla 26), voidaan ohittaa käyttämällä ACS880:n tarjoamaa, kriittiset nopeudet ja -taajuudet ominaisuutta. Tätä ominaisuutta voidaan myös käyttää, mikäli värähtelyä ilmenee vain tietyllä nopeusalueella joko kiihdytyksessä tai hidastuksessa, jolloin oskillaation vaimennusta ei tarvitse käyttää lainkaan.

Kriittisten nopeuksien käyttö pyrkii välttämään parametreille asetettuja nopeuden arvoja. Moottorin saavuttaessa kriittisen nopeuden rajan kiihdyttää tai hidastaa taajuusmuuttaja moottorin nopeutta mahdollisimman nopeasti, jotta kriittisellä alueella kulunut aika saataisi minimoitua. Kriittisten nopeuksien käyttö ei kuitenkaan vaikuta kiihdytys- ja hidastusrampille aseteltuihin aikoihin, koska taajuusmuuttaja kompensoi muutoksesta aiheutuneen aikaeron myöhemmin ohjeketjussa. (5.)

Alentamalla suhteellisen nopeuden vahvistusta ja nostamalla nopeuseron suodatusaikaa voidaan mekaniikasta poistaa värähtelyjä melko tehokkaasti (katso kuva 21 sivulla 27). Menetelmän käyttämisen ehdottomana edellytyksenä on, että järjestelmän dynaamisista ominaisuuksista voidaan tinkiä. Nopeuden suhteellisella vahvistuksella vahvistetaan nopeuden eroarvoa, jolloin säädin reagoi voimakkaammin nopeuden muutokseen. Nopeuseron suodatusajalla voidaan määrittää, kuinka usein säädin pyrkii korjaamaan nopeudessa esiintyvää virhettä.

4.2 Sähköisen värähtelynkorjauksen edut

Sähköinen värähtelynkorjaus on todennäköisesti paras keino vaimentaa vääntövärähtelyjä. ACS880-taajuusmuuttajan avulla voidaan värähtelynkorjaus suorittaa ilman ylimääräisiä asennuksia, kuten pyörimisnopeuden takaisinkytkentää moottorilta taajuusmuuttajalle.

Kohdassa 3.4 on todettu akselin halkaisijan kasvattamisen olevan tehokkain keino mekaanisessa värähtelyn korjauksessa. Sähkökäytön avulla pystytään korjaamaan mekaniikan ominaisuuksien puutoksista johtuvia värähtelyjä hyvinkin tehokkaasti. Tämän kaltaisella ominaisuudella voidaan ehkäistä kohdassa 3.2 lueteltuja värähtelyn haittavaikutuksia, mikä puolestaan lisää laitteiston huoltovapautta ja varmuutta sekä alentaa ylläpitokustannuksia.

Kieppumisesta johtuva hyppynarumainen värähtely edellyttäisi akselin uudelleen tasapainottamista tai jopa uudelleen valmistamista. Taajuusmuuttajaohjatulla sähkökäytöllä voidaan nopeasti ohittaa kriittiset taajuudet, joilla kieppumisvärähtelyä ilmenee.

Kuten kohdassa 3.2 todettiin, vääntövärähtelyt havaitaan usein vasta, kun jokin mekaniikassa antaa periksi. Taajuusmuuttajakäytöllä voidaan käyttöönottilanteessa suorittaa koeajo, jonka avulla analysoidaan mekaniikan ominaisvärähtelyn ominaisuudet ja tämän perusteella voidaan päättää, onko mekaniikan ominaisvärähtelyn taajuus ja amplitudi kompensointia vaativalla tasolla. Mikäli ominaisvärähtelyn todetaan olevan liian voimakasta, voidaan käyttönoton yhteydessä suorittaa kompensointi.

5 Mittaukset

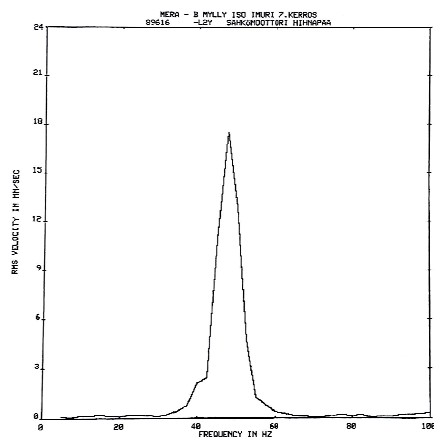
5.1 Värähtelyn mittaaminen ja matemaattinen käsittely

Vääntövärähtelyiden mittaaminen sähkökäytöllä vaatii aina testiajon, jonka aikana taltioidaan moottorilta saatavaa dataa. Kunnollisen vääntövärähtelyanalyysin tekemiseen tarvitaan mittausdataa sekä moottorin momentista että pyörimisnopeudesta. Analysoinnin kannalta ei ole väliä käytetäänkö mittauksessa nopeuden estimointia, vai takometrilta saatavaa todellista nopeutta.

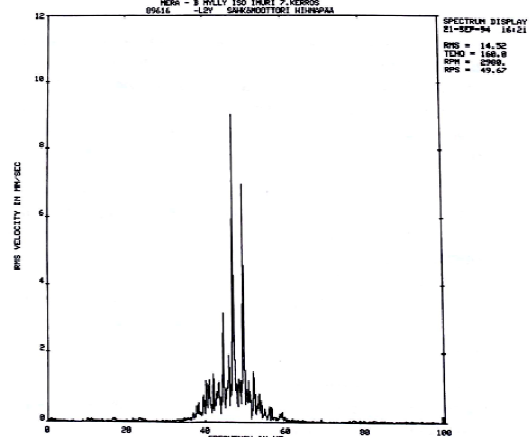
Mittauksessa mekaniikkaa ajetaan kuten sitä on suunniteltu käytettävän. Viritetty käyttö ajetaan nimellisnopeuteensa, momenttirajojen puitteissa. Ajon ajalta taltioidaan moottorin pyörimisnopeutta sekä momentin oloarvoa, joiden avulla selvitetään mekaniikan ominaisvärähtelytaajuus. Johtuen mittausdatan valtavasta määrästä, mittaustuloksista on käytännössä mahdotonta tehdä päätelmiä ilman matemaattisia tietokoneohjelmia.

Spektrin laskenta perustuu matemaattisten Fourier-sarjojen hyväksikäyttöön, joiden avulla voidaan osoittaa, minkä tahansa signaalin olevan eri taajuuksisten ja amplitudisten sinimuotoisten harmonisten signaalien summa. FFT on laskenta-algoritmi, jolla mittaustulosten muunnos aikatasosta taajuustasoon saadaan suoritettua todella nopeasti (14.).

Spektrin taajuuserotuskyky on värähtelyn analysoinnissa tärkeä määrittää oikein, testitulosten analysointi tarkkuuden parantamiseksi. Käytännössä taajuuserotuskyky merkitsee; kuinka lyhyellä aikavälillä olevat taajuusvaihtelut voidaan erottaa toisistaan. Erotuskyky saadaan ylätaajuuden ja spektriviivojen lukumäärän osamäärästä, joka tarkoittaa että tulos saadaan hertzeinä. Korkeita taajuuksia lukuunottamatta, tulisi erotuskyvyn olla pienempi kuin 2,5 Hz. (14.)



Kuva 12. Riittämätön taajuuserotuskyky (14.)

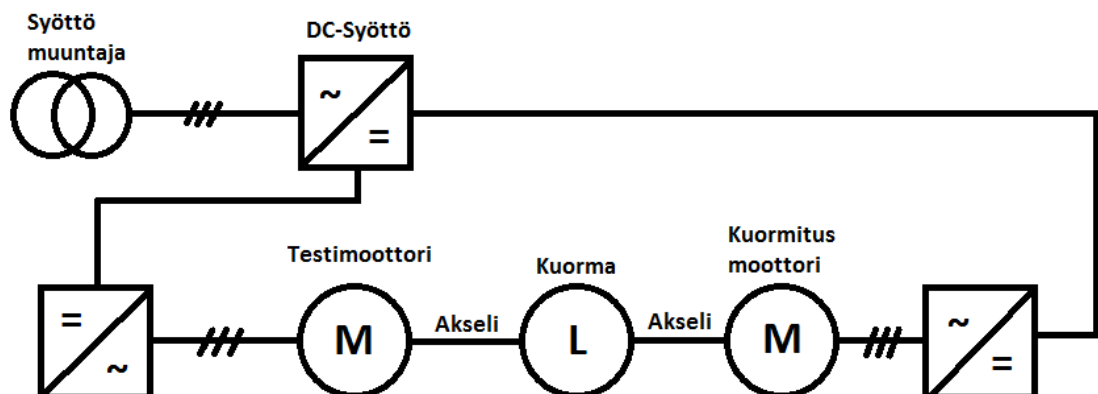


Kuva 13. Hyvä taajuuserotuskyky (14.)

Kuvista 12 ja 13 nähdään erotuskyvyn vaikutus analysoinnin tarkkuuteen. Kuvan 12 erotuskyky on täysin riittämätön, mittaluokan kaksi värähtelyjen analysointiin, koska toisen mittaluokan värähtelyissä esiintyy useita eri mekaniikan osia.

5.2 Mittausjärjestelyt vääntöväärähtelykokeessa

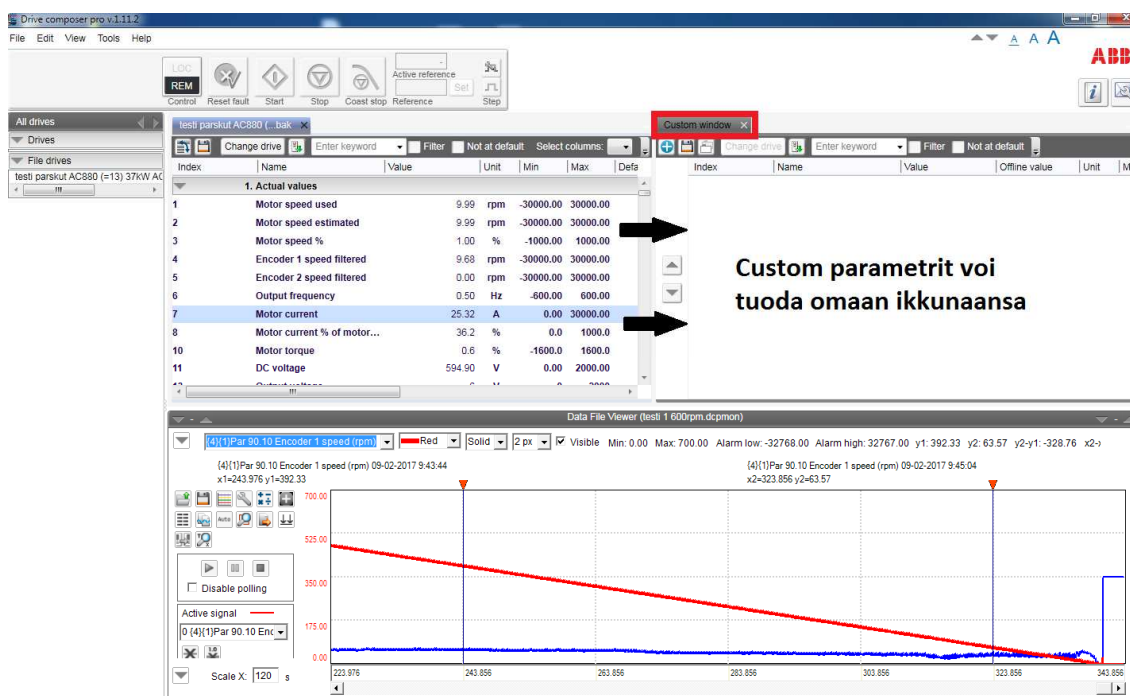
Vääntöväärähtelyn mittaukseen, analysointiin ja korjaukseen tarvittavat toimenpiteet suoritettiin kuvan 14 mukaisella järjestelyllä, ABB:n tarjoamissa testaustiloissa. Järjestelmältä vaadittiin moottorien ja niitä syöttävien taajuusmuuttajien lisäksi kuormaa, joka tässä tapauksessa oli yli kahden tonnin painoinen huimamassa. Kuormitusmoottorin tehtävänä on antaa mekaniikalle hallitun suuruisia ja kestoisia momentti-pulsseja, jotka simuloivat vääntöväärähtelyjä pahentavia herätteitä.



Kuva 14. Yksinkertaistettu periaatekuva mittauslaitteistosta.

Testimoottorina toimi ABB Motorsin valmistama M2BA 225SMC, 37 kW:n Oikosulku-moottori, jota syötetään ACS880-104-0094A-3-tyyppin taajuusmuuttajalla. Kuormitusmoottorina oli 37 kW:n kestopagneettimoottori vastaavalla taajuusmuuttajalla. Jokaista taajuusmuuttajaa hallitaan yhdeltä tietokoneelta, johon tuodaan ja viedään dataa ethernet-väylän avulla.

Drive composer on ABB:n valmistama taajuusmuuttajien ohjausjärjestelmä, jonka avulla voidaan samanaikaisesti hallita kymmeniä eri taajuusmuuttajia. Drive composerilla voidaan parametroida taajuusmuuttajat, ylläpitää tapahtuma lokia sekä suorittaa mittauksia. Drive composerilla on mahdollista piirtää kuvaaja minkä tahansa parametrin käyttäytymisestä sekä tulostaa mittaustulokset useassa eri formaatissa.

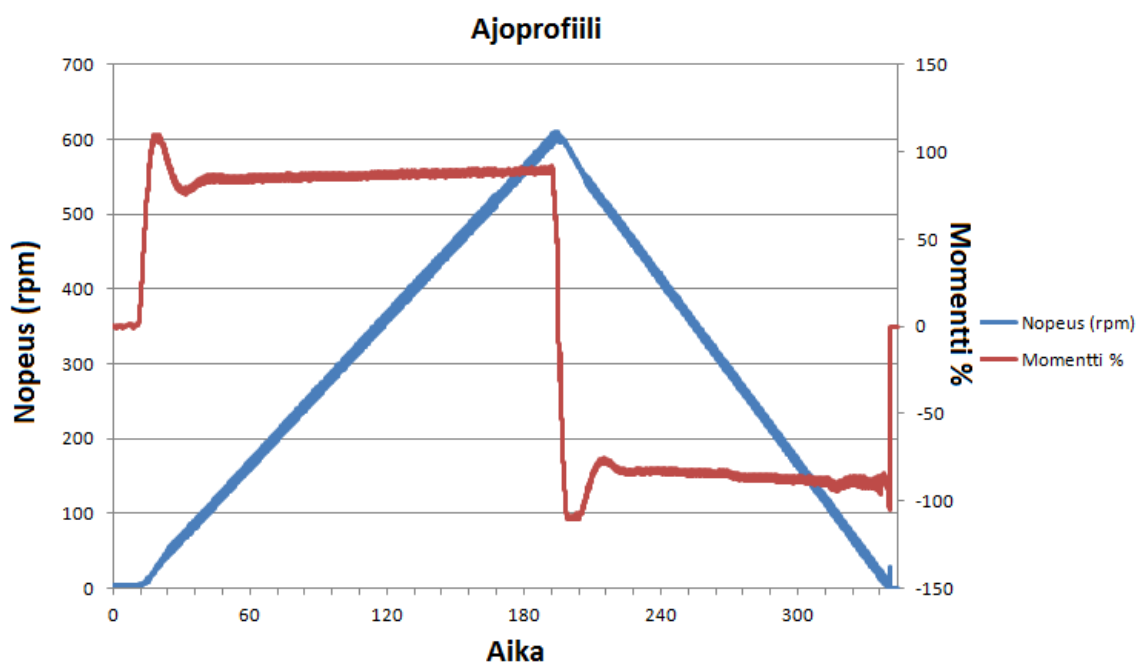


Kuva 15. Drive composer:in työpöytä näkymä.

Kuvassa 15 on työpöytä näkymä Drive composerista. Tärkeimpinä ominaisuuksina kuvassa näkyy parametrivalikko, piirtoikkuna sekä kustomoidut parametrivalikot, joiden avulla voidaan kaikki tärkeimmät parametrit yhdistää samaan työtilaan. Tämä helpottaa niiden hallintaa ja säätöä.

5.3 Vääntöväärähtelyn toteaminen ja analysointi

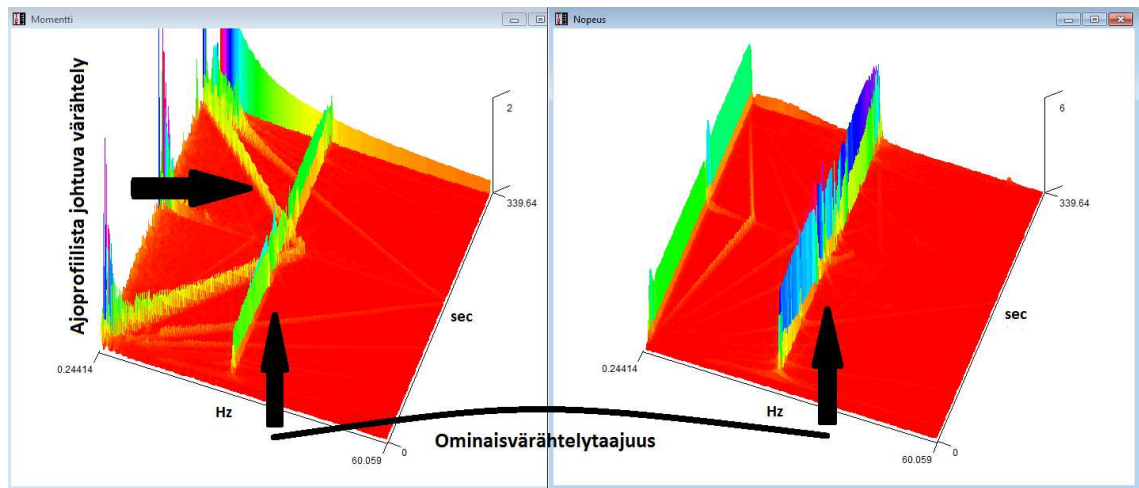
Väärähtelyn toteamiseksi on testiajossa tallennetut mittaustulokset ajettava FFT-analysointiin soveltuvalla ohjelmalla lävitse. Tässä työssä tehty analyysi tehtiin Sigview-nimisellä spektrianalysointiohjelmalla. Sigview hyväksyy useita erityyppisiä tiedostomuotoja, itse tallensin mittaustulokset TXT-tiedostona. Tässä tapauksessa Sigview olettaa ensimmäisen sarakkeen ajaksi ja lopuista sarakkeista se piirtää kuvaajat. Selkeyden vuoksi kuvaajat kannattaa nimetä ennen FFT-analyysiä. FFT muuntaa mittaustulokset aikatasosta taajuustasoon, jolloin on mahdollista paikantaa kyseisen mekaniikan ominaistajuuksia ja sen amplitudi. Ominaisajuuksia näkyy sekä momentissa että nopeudessa, mikä helpottaa taajuuden analysoinnissa koska molemmissa kuvissa tulisi näkyä ominaistajuuksia samassa kohdassa. Sigviewillä on mahdollista piirtää 2D- ja 3D-kuvaajia, mutta selkeyden vuoksi tässä työssä on käytetty ainoastaan 3D-kuvaajia. Kuvaajien värimaailmaa on mahdollista vaihtaa, tässä työssä on käytetty väreinä sateenkaaren sävyjä, joista värit vaihtuvat sitä kylmempäsävyiseksi, mitä korkeampi sen amplitudi on.



Kuva 16. Testiajoprofiili analysoidusta datasta.

Mekaniikan ominaisvärähtelytaajuuden toteamiseksi voidaan suorittaa esimerkiksi kuvan 16 kaltainen testiajo. Usein kuitenkin halutaan selvittää tasaisen ajonopeuden osalta värähtelyn ominaistaajuus, joten tasaisen ajon pituus tulee normaalisti olla pidempikestoinen. Kuvassa 17 esitetyssä FFT-analyysissä on analysoitu kuvan 16 ajo-profiilin mukainen testiajo.

Analysointia tehdessä havaitsee FFT:n piirtävän myös ajoprofiilin mukaisen värähtelykuvion, mutta sitä ei pidä sekoittaa ominaistaajuuteen. Kuvassa 17 näkyy myös paljon matalaa värähtelyä ympäri kuvaa. Nämä ovat värähtelytaajuuksien kerrannaisia, joiden vaikutus ei niiden pienuudesta johtuen ollut oleellista.

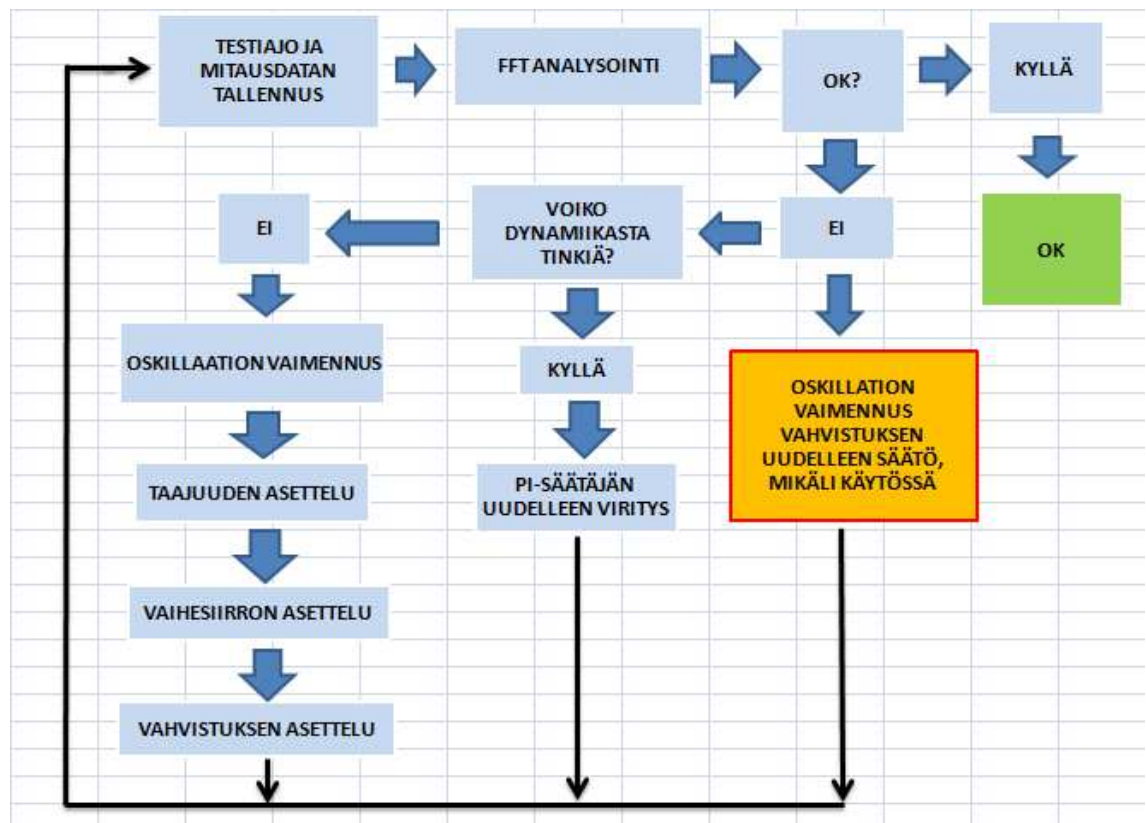


Kuva 17. FFT muunnettu mittausdata.

Kuvasta 17 voi todeta värähtelyn ominaistaajuuden näkyvän huomattavasti selkeämmin nopeudessa, kuin momentissa. Tässä tapauksessa mekaniikan ominaisvärähtelytaajuus osui noin 26,2 Hz:n tietämille ja on nopeudessa korkeimmalta amplitudiltaan 6,6 yksikköä. Usein käyttöönotossa pidetään kompensoinnin rajana 0,2 yksikköä, joten tässä tapauksessa mekaniikka kaipasi värähtelynkorjausta.

6 Parametroinnin vaikutukset

Oikeanlaisella parametroinnilla voidaan eliminoida värähtelyjä todella tehokkaasti. FFT-analyyseissä on selkeästi havaittavissa värähtelyn vaimentuminen säädön muuttuessa parempaan suuntaan. Hyvä säätö ei ainoastaan vaimenna ominaisvärähtelytaajuudella tapahtuvaa värähtelyä, vaan myös kerrannaistaajuuksilla tapahtuvaa värähtelyä.

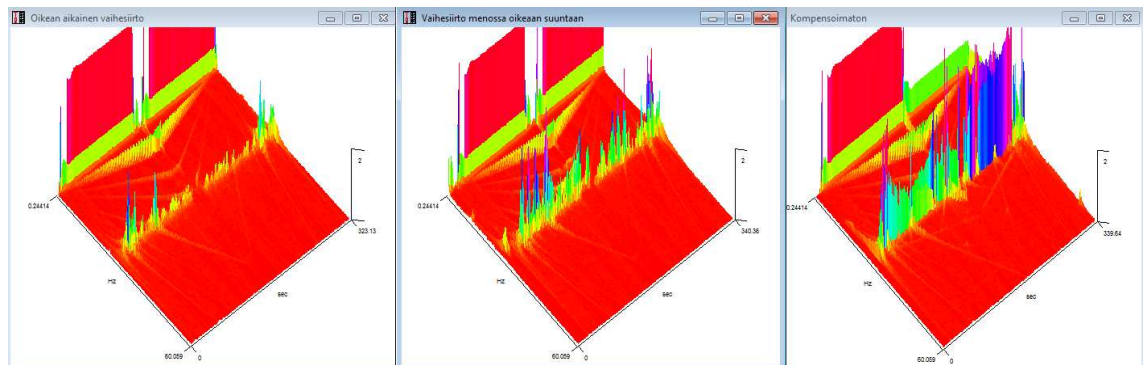


Kuva 18. Työjärjestys sähköisessä värähtelynvaimennuksessa.

Kuvassa 18 on esitettyä karkea järjestys, kuinka sähköisessä värähtelynvaimennus prosessissa tulisi edetä. On siis tärkeää suorittaa uusi testiajo sekä analysointi jokaisen säätökerran jälkeen, jotta voidaan todeta kompensoinin toimivuus tai puutteellisuus.

6.1 Vaihesiirron vaikutus värähtelynvaimennuksessa

Vaihesiirto parametrin avulla voidaan muuttaa hetkeä, jolloin oskillaation vaimennus-suodin antaa momenttisäätäjälle värähtelyn vaimennukseen tarvittavan vastamoment-tiohjeen. Suodin seuraa nopeusvirhettä ja sopivassa vaiheessa nopeusvirheeseen nähden annettu vastamomentti vaimentaa niin nopeusvirhettä kuin vääntövärähtelyä-kin. Nopeusvirhe on siis muuttuva arvo, jonka arvo vaihtelee jatkuvasti moottorin pyöri-essä ja käytännössä sen piirretty muoto on siniaaltomainen.

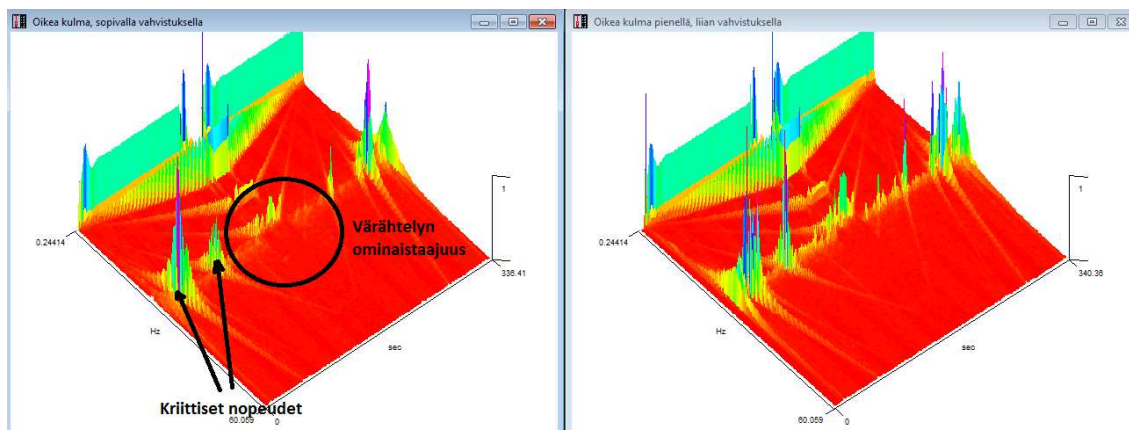


Kuva 19. Vaihesiirron vaikutus värähtelynkorjauksessa.

Vaihesiirron vaikutus värähtelyn vaimennuksessa on kaikkein merkityksellisin. Kuvassa 19 on esitettyä oskillaation vaimennus vaihesiirtoparametrin vaikutus värähtelyyn. Oikealla on FFT-analysointikuva kompensomattomasta tilanteesta, keskellä vaja-vaisella vaihesiirrolla tehty kompensointi ja vasemmalla hyvin vaihesiirroltaan onnistunut kompensointi. Matalla vahvistuksella suoritettussa kokeessa saatiin vaihe-siirron vaikutuksella vaimennettua ominaisvärähtelyn maksimiampplitudi 6,7 yksiköstä 0,5 yksikköön.

6.2 Vahvistuksen vaikutus värähtelynkorjauksessa

Vahvistusta kasvattamalla voidaan kasvattaa oskillaation vaimennussuodattimen antaman vastamomenttiohjeen amplitudia. Riittävällä vahvistuksella voidaan värähtely eliminoida liki kokonaan, mutta liiallinen vahvistus puolestaan lisää värähtelyä. Kuvassa 20 on esitettyä vahvistuksen vaikutus värähtelynkorjauksessa siten, että vasempana olevassa analyysissä on lisätty vahvistusta oikeaan nähden.

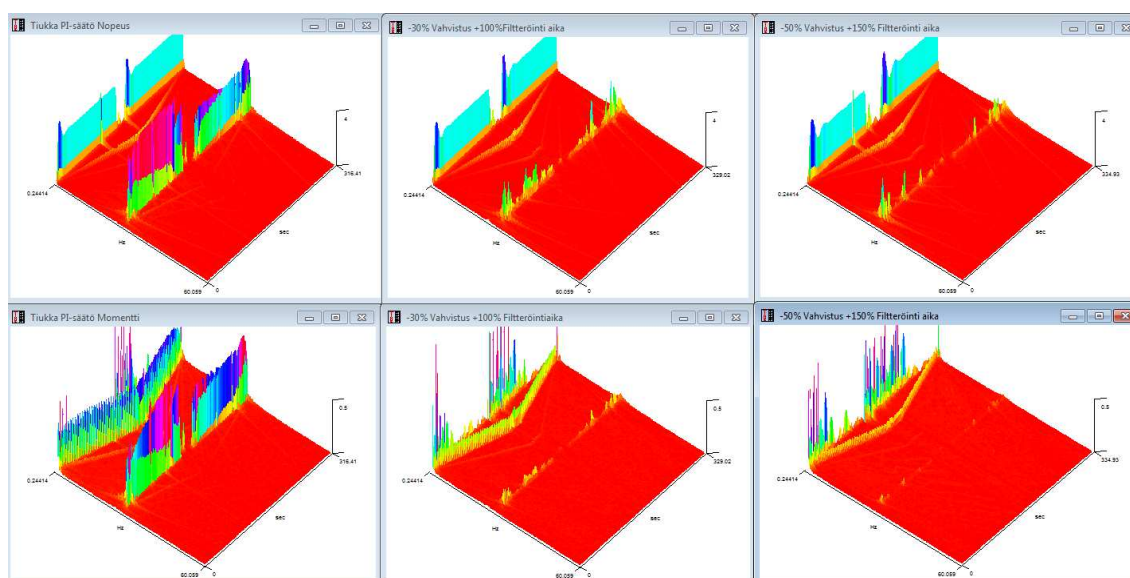


Kuva 20. Vahvistuksen vaikutus värähtelynkorjauksessa.

Vahvistusta lisäämällä saadaan värähtelyn vaimennus riittävän voimakkaaksi, ettei siitä ole enää merkittävää haittaa mekaniikalle. Kuvasta 20 voidaan tulkita ominaistajuudella tapahtuvan ominaisvärähtelyn vaimenneen liki olemattomiin. Vaimennus ei pure yhtä tehokkaasti värähtelyn kerrannaistajuuksiin, minkä vuoksi kerrannaistajuuksien amplitudit ovat huomattavasti korkeampia. Kerrannaistajuuksien aiheuttamat värähtelypiikit voidaan kuitenkin kätevästi eliminoida ohittamalla kriittiset nopeudet, joilla värähtelyä ilmenee. (Katso kohta 4.2.)

6.3 PI-säädön vaikutus värähtelynkorjauksessa

Värähtelynvaimennus on mahdollista tehdä myös PI-säätimen oikeanlaisella parametroinnilla. Yleisesti ottaen tähän voidaan turvautua niissä tapauksissa, kun käytön dynaamisille ominaisuuksille ei aseteta liian korkeita vaatimuksia. Tämän kaltaisen säädön ideana on virittää mekaniikka riittävän ”laiskaksi”. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, ettei käyttö pyri reagoimaan prosessissa tapahtuviin muutoksiin kovinkaan nopeasti ja voimakkaasti. Tämä vähentää nopeuden ja momentin äkillisiä muutoksia, jolloin vääntövärähtely vähenee. Kuvassa 21 on esiteltynä värähtelyn vaimentuminen käyttäen PI-säädön löysäämistä. Säädön löysäämisessä alennetaan nopeuden suhteelliselle vahvistukselle annettua arvoa ja kasvatetaan nopeuden eroarvon suodatusaikaa.

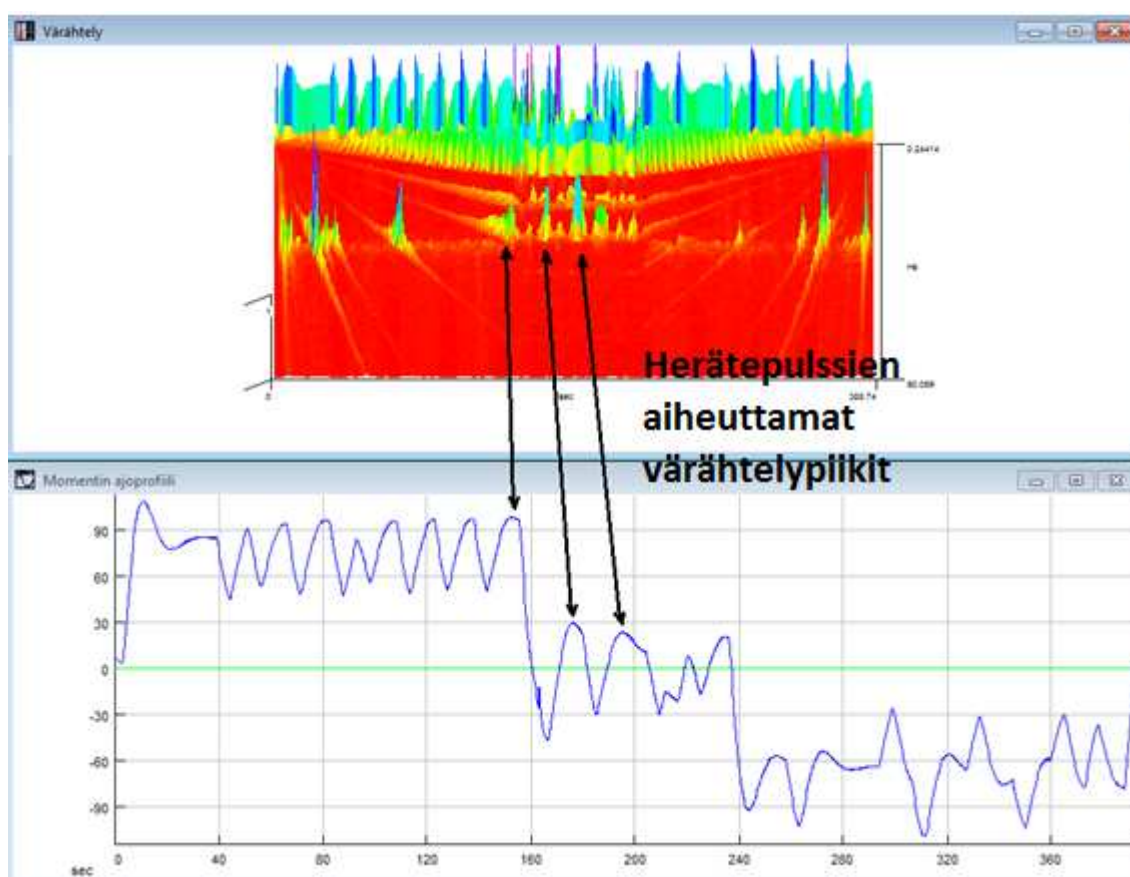


Kuva 21. PI-virityksen vaikutus värähtelyyn. Yläkuvissa nopeus, alhaalla momentti.

Kuvassa vasemmalla on analysoituna todella jäykäksi PI-viritetty. Keskimmäisessä kuvassa on PI-säätäjän vahvistusta laskettu kolmellakymmenellä prosentilla ja nopeuden eroarvon suodatusaika nostettu kaksinkertaiseksi. Oikeanpuoleisessa analyysissä on suhteellinen vahvistus laskettu puoleen alkuperäisestä ja eroarvon suodatusaika 2,5-kertaistettu. Kompensointia tehtäessä voidaan oikeanpuoleista säätöä pitää riittävän hyvänä jatkuvaan käyttöön.

6.4 Herätteiden vaikutus kompensoituun mekaniikkaan

Kokeessa testattiin herätteiden vaikutus vääntöväärähtelyyn. Kuvan 14 mukaisella testauslaitteistolla, mekaniikalle annettiin kuvan 22 kuvaajan mukaisesti vasta- ja myötämomenttipulsseja kuormitusmoottorin avulla, joiden suuruus vaihteli satunnaisesti. Herätepulssin osuessa ominaisväärähtelyn kanssa samaan vaiheeseen voimistaa se vääntöväärähtelyä, aiheuttaen mekaniikalle suuria, ei toivottuja voimia, jotka voivat pahimmassa tapauksessa katkaista akselin. Kokeessa käytettiin kuvan 20 mukaisesti väärähtelykorjattua mekaniikkaa ja tutkittiin sen käyttäytymistä, mekaniikan saadessa herätepulssi noin kymmenen sekunnin välein.



Kuva 22. Herätepulssien vaikutus värähtelykorjatussa mekaniikassa.

Säädön hyvyys on todettavissa viimeistään tässä vaiheessa. Kuvasta 22 voi nähdä, herätepulsseista aiheutuvan värähtelyn vaimenevan liki olemattomiin ennen uuden pulssin tuloa. Väärähtelyssä ei ole havaittavissa erityisiä piikkejä muualla kuin tasaisen ajon osuudella, joten kompensointi näyttää toimivan erinomaisesti kiihdytys- sekä jarrutustilanteissa.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ACS880-taajuusmuuttajan värähtelynkorjausominaisuuksia, ja tutkimustulosten pohjalta luotiin käyttöönottotarkoitukseen sopiva viritysohje. Ohjeen avulla voitiin aktiivivaimennus palauttaa osaksi käyttöönotto toimenpiteitä.

Värähtelynkorjaus on aina suoritettava käyttökohteen ominaisuuksien ja dynamiikka vaatimusten mukaisesti. Ominaisvärähtelytaajuus on riippumaton käyttöletkan ajoprofiilista, mutta mikäli letkalla ei ole korkeita vaatimuksia dynamiikan suhteen, voidaan PI-säätäjä virittää siten, ettei mekaniikan värähtelytaso nouse tasolle, jolla kompensointiin tarvitaan oskillaation vaimennus ominaisuutta. (Katso kuva 21 oikean puoleinen analyysi.)

Korkeat dynaamiset vaatimukset täyttävä PI-viritetty mekaniikka värähtelee yleensä melko runsaasti ja varsinkin ominaisvärähtelytaajuuden amplitudit voivat nousta hyvinkin korkeiksi (katso kuva 17). Kompensointitarvetta selvitetäessä voidaan värähtelyamplitudin korkeusrajana pitää 0,2 yksikköä momentissa sekä nopeudessa. Kuvassa 17 on amplitudien korkeus jopa yli kuusi yksikköä, jolloin värähtelynkorjaus on ehdottomasti suoritettava.

Oskillaation vaimennuksessa on ensisijaisen tärkeää, asettaa ominaisvärähtelytaajuuden arvo sekä vaihekulma oikein, jottei epäonnistuneen säädön seurauksena synny uusia värähtelytaajuuksia ja/tai värähtelyn voimistumista. Oikean ominaisvärähtelytaajuuden löydyttyä kompensoi oskillaation vaimennus sille annetun taajuusarvon värähtelyä. Vaihekulman määrittäminen on oikean taajuuden jälkeen voimakaimmin värähtelynvaimennukseen vaikuttava tekijä. Oikeaan nopeusvirheen vaiheeseen vaikuttava oskillaation vaimennus, vaimentaa värähtelyamplitudeja jo pienelläkin vahvistuksella. Kuvassa 19 on värähtelyamplitudit saatu vaimennettua 6,7 yksiköstä 0,5 yksikköön.

Viimeisessä vaiheessa hienosäädetään oskillaation vaimennusvahvistusta. Tämän parametrin avulla saadaan värähtelyamplitudit vaimennettua alle 0,2 yksikön suuruiseksi. Lisäksi nopeusalueet, joihin kompensoinnin vaikutus ei ole riittävä, ohitetaan kriittisinä nopeuksina (katso kuva 20).

Onnistunut kompensointi reagoi myös herätteisiin. Kohdassa 6.4 tehdyn heräte-analyysin perusteella onnistunut kompensointi vaimentaa herätepulsseista aiheutuvaa värähtelyä erityisen hyvin sekä, kiihdytys että hidastus tilanteissa. Tasaisen ajon aikana tapahtuvat, herätepulsseista aiheutuvat värähtelyamplitudit pysyvät melko matalina ja vaimenevat tehokkaasti. Huonolla komensoinnilla tai kompensoimattomassa mekaniikassa voi herätepulsseilla olla tuhoisia seurauksia. Korkean ominaisvärähtelyamplitudin kanssa samaan vaiheeseen osuva herätepulssi voimistaa värähtelyn amplitudia, mikä aiheuttaa suuria mekaanisia rasituksia ja voi joissakin tapauksissa johtaa akselin katkeamiseen.

Opinnäytetyön ohessa tehtiin ABB:n käyttöön sisäinen ohje, joka sisältää yksityiskohtaisempaa tietoa mittauksista, tuloksista ja parametroinnista. Ohjeen tarkoituksena on tuoda esiin tärkeimmät lähtökohdat värähtelynvaimennukseen, siten että vain huippukäyttöoottomiehet voivat sitä hyödyntää.

Lähteet

1. ABB. 2001. Tekninen opas nro 1, Suora momentinsäätö.
<https://library.e.abb.com/public/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/Tekninenopasnro1.pdf>
2. ABB. 2001. Tekninen opas nro 6, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas.
https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf
3. ABB. 2001. Tekninen opas nro 7, Sähkökäytön mitoitus.
https://library.e.abb.com/public/b11dfe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf
4. ABB. 2001. Tekninen opas nro 8, Sähköinen jarrutus.
https://library.e.abb.com/public/2e30f9c0e2d07b9ac1256d28004152df/Tekninen_opasnro8.pdf
5. ABB. 2016. Ohjelmointiopas. ACS880-Perusohjausohjelma,
https://library.e.abb.com/public/67543da7083f4f7db9477ab43c56b5b2/AINF240x_fi.pdf
6. Vartiainen, Hannu. 2017. Manager, Application and Field Services. ABB.
Haastattelu.
7. Tuoteluettelo, ACS880-taajuusmuuttajat, ABB,
https://library.e.abb.com/public/cb0da58246ba4a62aaae948d808fcc7d/FI_ACS880_single_drives_3AUA0000124140_RevJ.pdf
8. Gavelin, Gunnar. 1998. Paper machine design and operation. Angus Wilde Publications.
9. Harju, Joni. 2013. ACS880 Toiminnallisuus. Vaasan ammattikorkeakoulu.
10. Hellberg, Janne. 2009. Vääntöväriähtelyjen vaimennusmenetelmät ja niiden automaattinen viritys taajuusmuuttaja ohjatussa sähkökäytössä. Teknillinen korkeakoulu.

11. Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetty sähkömoottorikäytöt. Tampere: Tammertekniikka.
12. Mård, Matti. 1993. Sähkökäyttö ja tehoelektroniikka. Otatieto.
13. Niiranen, Jouko. 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Otatieto.
14. Nohynek, Perti & Lumme, Veli Erkki. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Helsinki, KP-Media.
15. Kaijankoski, Juha. 2012. PPK6:n Sähkökäyttöjen elinkaaren hallinta ja kehittäminen. Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulu.
16. <http://www.pacosservices.com>. 2017.